

大型高炉の装入物分布と通気性

Distribution of Burden Materials and Gas Permeability in a Large Volume Blast Furnace

山 田 孝 雄*

Takao Yamada

佐 藤 政 明**

Masaaki Sato

宮 崎 伸 吉***

Nobuyoshi Miyazaki

嶋 村 鎭 郎****

Hideo Shimamura

田 口 整 司*****

Seiji Taguchi

Synopsis :

Distributions (size of burden, layer thickness of bed, etc.) of burden in shaft are practically measured during the charging period before No. 4 blast furnace of Mizushima Works was blown in. Additionally, several fundamental experiments are carried out on the gas permeability through coke and iron ore bed with particle size of practical use.

The results are summarized as follows :

- 1) The characteristics of burden on the gas permeability in shaft depend on its particle size.
- 2) The surface shape of burden in periphery zone of shaft is changed by the position of movable armour plate equiped on No. 4 blast furnace, so the relative gas permeability of the center and the periphery zone of blast furnace can be changed. But the position of movable armour plate has little effect on the segregation of size and the thickness distribution in the center.
- 3) Radial segregation of coke in blast furnace is large, but that of iron ores is small.
- 4) On the travelling process from hopper to blast furnace, sinter is coarsely crushed and coke fines increase. The size distribution of raw ore does not change before and after a charge.
- 5) Radial distribution of gas flow resistance in shaft calculated from the present measurement is homogeneous.

1. 緒 言

高炉シャフト部での装入物分布（粒径分布，層厚分布）は，炉内のガス流れと密接な関連をもち，操業を左右する重要な因子の一つである。近年高炉の大型化にともない，炉口径はいちじるし

く拡大したが，この拡大は炉半径方向において装入物分布の不均一化をひきおこすことになる。この不均一化を抑制し，かつ適正な装入物分布を得るために，大型高炉ではムーバブル・アーマールを備えるようになったが，その装入物分布におよぼす具体的な効果についてはあまり明確でない。また従来より，高炉の装入物分布に関しては，実物

* 水島製鉄所製鉄部製鉄管理課課長

*** 技術研究所水島研究室主任研究員

** 水島製鉄所製鉄部製鉄管理課（現原料処理課）

**** 技術研究所水島研究室

大での調査方法が難かしく、主として縮尺模型による検討が行なわれているが、その実炉との対応関係を確認することも意義あることと思われる。一方、高炉の装入物分布と炉内ガス流れとの関係についても、実用の装入物粒度での検討はあまりなく、小径粒子による実験から得られた種々の通気抵抗式が用いられている。しかし、これらの式が実際の高炉装入物について適用できるか否かは不明である。

昭和48年4月25日に火入れした水島製鉄所第4高炉は内容積4323m³、炉口径10.5mの超大型高炉であり、G. H. H. 型のムーバブル・アーマーが設置されている。そこで、その填充時を利用して、ムーバブル・アーマーの装入物分布を制御する効果および実炉内での装入物分布状況を知るために二、三の測定を行った。また、この測定に先だって、高炉装入物の通気性に関する基礎的実験を行ない、実用粒度範囲における装入物の通気抵抗についても検討した。その結果、大型高炉内での装入物分布および通気抵抗に関する若干の知見を得たので報告する。

2. 実用粒度の装入物の通気性に関する基礎実験

従来より、高炉の装入物分布および充填層の圧力損失式など高炉内のガス流れに関する実験についての報告は数多いが、それらは主として縮尺模型実験によるものである。一般に充填塔に装入される粒子の充填度は、塔直径と粒子径との比が小さい場合には、この比の影響を受ける¹⁻³⁾。したがって、縮尺模型の場合、粒子径もその制約を受け、これらの実験に用いられた試料はその縮尺の程度に応じて実用の粒度よりかなり小さい。

一方、高炉に装入されるコークスおよび焼結鉱などの破砕固体では、粒子の大きさにより粒子表面の物理的形狀（球形度、表面粗さなど）に差異があると考えられる⁴⁾。この粒子表面の物理的形

状の差異が、充填塔における粒子の充填度、およびガス流れに対する抵抗係数の相違をもたらすことはよく知られており²⁻⁵⁾、両者は通気性に関する重要な因子である。それゆえに、実用粒度の高炉装入物について、その通気性に関連する諸特性を知るため、二、三の基礎的な実験を行った。

2-1 実験内容および方法

実験で用いた試料は高炉装入前のコークスおよび焼結鉱で、これらをそれぞれ **Table 1** に示すフルイによって各フルイ目間の均一粒径試料としてコークス9段階、焼結鉱7段階に分けた。これら均一粒径試料内の最大粒径と最小粒径の比は計算上すべて約1.4で同一となっており、この程度の粒径比の範囲内では、その充填度に関して厳密な同一粒径試料の充填とほとんど差はなく⁶⁾、実用上均一粒径試料と見なすことができる。

測定はまずこの16種の均一粒径試料について安息角、嵩密度、見かけ密度および通気抵抗係数を測定し、つぎにそれぞれコークス、焼結鉱粒子別に異径粒子の混合によって人為的に粒度分布を与えて嵩密度および通気抵抗係数の変化を測定した。

(1) 安息角

安息角の測定方法は種々あり、使用目的に都合の良い方法が採用されるのが普通である。ここでは **Fig. 1 (a)** に示す垂直壁

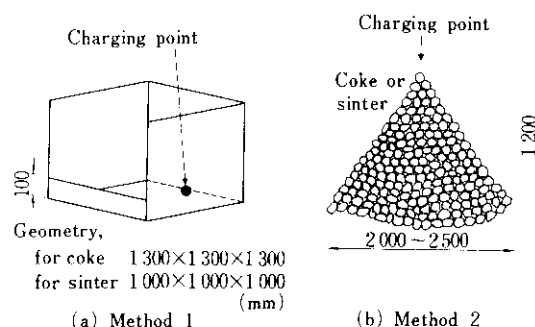


Fig. 1 Scheme of method for measuring angle of repose

Table 1 Screen meshes for classifying of burden materials (mm)

Coke	100	73	53	38.5	28.0	20.5	15.0	11.0	8.0	6.0
Sinter	—	—	50	36	26	18.5	13.5	9.5	7.0	5.0

に寄せて最大傾斜面を作る方法（斜面法とする）および Fig. 1 (b) の円錐状に落下堆積させる方法（円錐法とする）の2通りの方法によった。測定時に試料の装入は、なるべく試料に運動を与えないようにしたので、得られた結果は静的安息角と言える。

(2) 嵩密度および見かけ密度

ガス流れに関する装入物の充填度は空隙率 ε によって表わされる。 ε は次式で定義される。

$$\varepsilon = 1 - \rho_b / \rho_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

ρ_b ; 嵩密度 = (充填粒子全体の質量) / (充填層の容積)

ρ_a ; 見かけ密度 = (粒子1個当りの質量) / (粒子1個の体積)

コークスおよび焼結鉱のように、内部に不均一な気孔を含み表面形状が複雑な粒子の見かけ密度は粒径によって変りうるので、嵩密度の変化をそのまま空隙率の変化と対応づけることはできない。したがって見かけ密度の粒径による差異も明らかにする必要がある。

嵩密度の実験容器を Fig. 2 (a) に示す。容器が大きいので、装入時に粒度偏析を生じやすいことおよび充填度合が局所的に異なることもありうるので、これを防ぐため Fig. 2 (b) に示すような鋼製の羽根を入れておき、装入とともに引き上げながら静かに充填した。この方法によれば、実用上

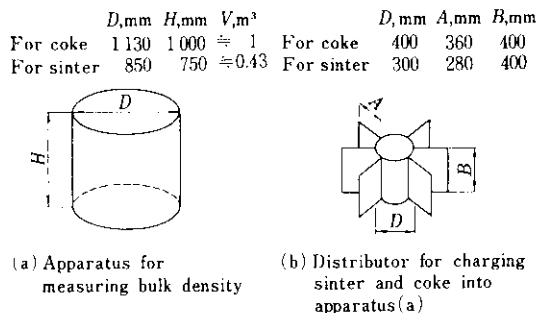


Fig. 2 Scheme of method for measuring bulk density of sinter and coke (These apparatus were made of steel)

もっとも疎な充填状態の嵩密度が測定され、測定値の再現性も非常に良かった。なお、容器径は最大測定粒子径の11倍以上となっている。ガス流れに有効な空隙率を求めるため、充填粒子の表面の大小気孔および凹面部に属する空間は流れに無関係と考え、これらの空間はすべて粒子の体積に含まれるような見かけ密度の測定方法を採用した。すなわち、焼結鉱では表面の気孔および凹面部を油粘土で埋めた後、全表面をパラフィンで覆い、試料粒径に応じて 20~200 個の試料と水との体積置換によった。一方、コークスでは表面の凹凸が少ないため見かけ密度を JIS 法に準拠して、1 回につき 4~10kg の試料と水との体積置換により求めた。

(3) 通気抵抗係数

ガス流れに対する充填層粒子の抵抗係数を求めるための通気抵抗実験装置は Fig. 3 に示すときものである。この装置の充填塔部分にはパイプレーターの取付けが可能であり、充填状態を疎から密に変化させるために、28.9 回/sec の振動数で上下、左右方向に、等しい任意の振幅をもつ振動を与えることができる。この振幅が約 2 mm のときコークス、焼結鉱ともに数秒で実用上もっとも密な充填状態に達し、そのときの空隙率は疎充填の場合よりも 4.5~6.5% 減少する。その後は振動を与えても空隙率

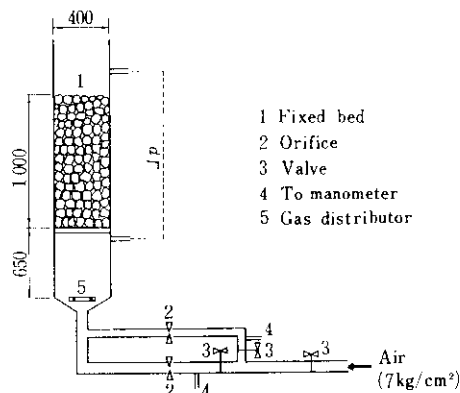


Fig. 3 Experimental apparatus for measuring gas permeability through fixed bed

の変化はなく一定である。実験に使用したガスは圧縮空気であり、測定時の最大流量は $7.0\text{Nm}^3/\text{min}$ であり、充填塔部における空塔基準のガス流速は $1.0\text{m}/\text{sec}$ となる。この範囲の流量の測定は大小2つのオリフィス流量計によった。

2-2 実験結果

均一粒径試料について静的安息角の測定結果をFig. 4に示す。コークス、焼結鉱ともに斜面法と円錐法との間に差異はなく、安息角は粒径の増加ともなって 44° 付近まで上昇するが、それ以後は横ばいしないし下がり気味となる。またコークスでは、粒径 7mm から 13mm の間ではこの傾向が逆転している。全体的にコークスと焼結鉱とで

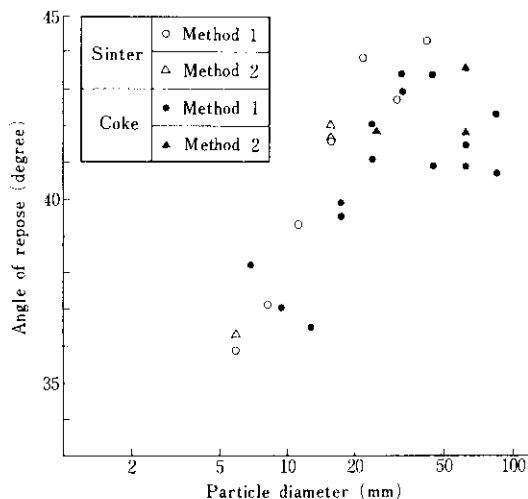


Fig. 4 Relation between angle of repose and particle size of sample

Table 2 Bulk and apparent densities of samples

Coke	d_i (mm)	6.62	9.09	12.4	17.3	23.4	31.9	44.7	61.9	81.8
	ρ_b ($\text{g}/\text{cm}^3\text{-bed}$)	0.504	0.495	0.496	0.504	0.504	0.487	0.471	0.436	0.427
	ρ_a (g/cm^3)	0.937	0.910	0.929	0.959	0.956	0.970	0.967	0.936	0.915
Sinter	d_i	5.64	7.71	11.0	14.4	21.4	27.4	37.1	—	—
	ρ_b	1.893	1.837	1.810	1.717	1.574	1.546	1.531	—	—
	ρ_a	3.24	3.01	3.07	2.86	2.91	2.92	2.82	—	—

Table 3 Dependence of bulk density on the size distribution index (I_{SP})

Coke				Sinter			
Nominal dia.	D_F (mm)	I_{SP} (—)	ρ_b (g/cm^3)	Nominal dia.	D_F (mm)	I_{SP} (—)	ρ_b (g/cm^3)
24mm	24.4	6.77	0.517	10mm	9.90	13.0	1.811
	23.9	11.3	0.520		10.2	19.8	1.834
	24.2	20.6	0.521		10.9	30.6	1.847
	24.6	33.2	0.525		9.78	48.0	1.864
	24.2	43.5	0.524		10.7	52.7	1.871
36mm	36.2	5.83	0.491	14mm	14.0	11.2	1.746
	36.2	10.9	0.496		14.7	16.8	1.751
	39.5	12.4	0.493		14.5	29.0	1.769
	36.0	21.6	0.496		14.0	36.6	1.774
	37.5	29.1	0.499		12.9	51.0	1.813
50mm	51.4	5.2	0.469	19mm	19.3	13.1	1.692
	50.8	12.6	0.470		19.1	22.1	1.701
	49.4	16.4	0.471		18.6	25.6	1.715
	50.4	21.3	0.473		18.6	42.3	1.742
	49.2	26.3	0.480		18.2	48.9	1.757

D_F : Harmonic mean diameter

は同一粒径の安息角は大きな差はなくやや焼結鉱が高いようである。この静的安息角は粒子間の摩擦角と密接な関係があり、一般に粒子形状が同じならば摩擦角が大きいほど疎な充填になりやすいので、粒子充填度に関して重要な因子でもある。

均一粒径試料の嵩密度および見かけ密度の測定値を **Table 2** に示す。**Table 3** は調和平均径を一定として粒度分布をもたせた場合の粒度の広がりや嵩密度の変化を示している。ここで調和平均径 D_p および粒度分布の広がりやの大きさを示す粒度分布指数 I_{sp}^0 は次式で定義されている。

$$D_p = 1 / \sum (w_i / d_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I_{sp} = 100 \sqrt{I_s} \cdot I_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I_s = D_p^2 \sum w_i (1/d_i - 1/D_p)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$I_p = (1/D_p)^2 \cdot \sum w_i (d_i - D_p)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

この結果から均一粒径試料について充填時の空隙率を求めると **Fig. 5** のごとくなる。空隙率も粒径の増大とともに増加するが最大値に達した後は横ばいとなっている。**Fig. 4** と **Fig. 5** を比較すると安息角と空隙率の変化はコークス、焼結鉱

のおおのようでよく対応している。なお、安息角がほぼ等しい粒径においてもコークスと焼結鉱とで空隙率の差があることは、焼結鉱の方がコークスに比べ、より球形に近いことを示すものと思われる。ここで得られた均一粒径についての空隙率を基準として、粒度分布の広がりによる空隙の減少率を示したのが **Fig. 6** である。この図において、調和平均粒径が異なる場合にも空隙減少率と粒度分布指数との関係は同じと見なせるので、前図とあわせて、疎な充填状態にある場合のコークス、焼結鉱の空隙率は D_p および I_{sp} が求まれば、次式で推算できる。

$$\text{コークス ; } \epsilon = (0.153 \log D_p + 0.418) (1 - \Delta\epsilon) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta\epsilon = 1.225 \times 10^{-2} \cdot I_{sp}^{0.416}$$

ただし、

$$2.4 \leq D_p \leq 6.3 \text{ (cm)}$$

$$\text{焼結鉱 ; } \epsilon = 0.403 D_p^{0.44} (1 - \Delta\epsilon) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta\epsilon = 1.64 \times 10^{-3} \cdot I_{sp}^{1.006}$$

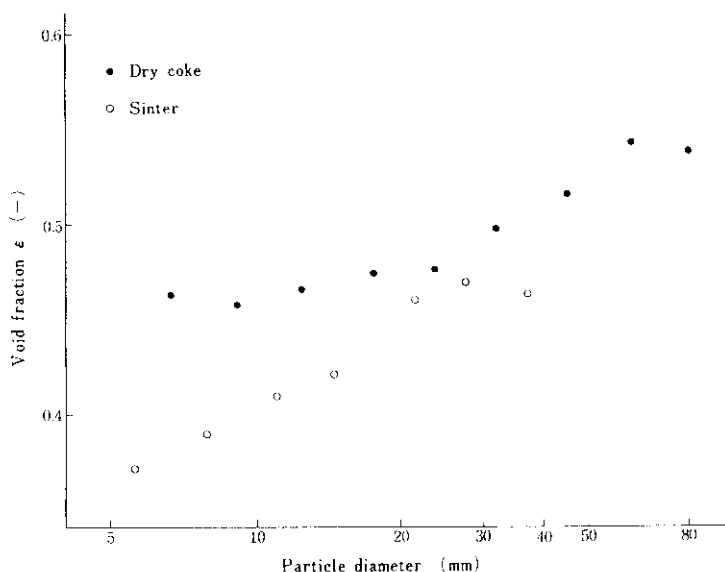


Fig. 5 Relation between particle size and void fraction in the case of $I_{sp}=0$

なお、これらの式を用いて推算した ε と実測値との誤差は空隙率として1%以下であった。高炉シャフト部におけるコークス、焼結鉱層の空隙率との対応に関しては、これらの装入物はゆっくり下方へ移動する層をなしており、充分疎な充填状態にあると考えられ、(4)式および(5)式が適用できるであろう。

充填層におけるガス流れの圧力損失を表わす式として種々のものが提唱されているが、本実験の解析結果からは次のような Ergun による方法がもっともよく合致することがわかった。

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{\mu u_0} \cdot \frac{g_0 \cdot (\phi_0 D_p)^2 \cdot \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = k_1 + k_2 \cdot \frac{\phi_0 \cdot D_p \cdot \rho \cdot u_0}{(1-\varepsilon)\mu} \quad (6)$$

ここで、 ϕ_0 は粒子1個の比表面積に関する球体からのずれの程度を示す係数で、Carmanの形状係数と呼ばれるものである。上式は層流域から乱流域まで適用範囲の広い式であり、式中の抵抗係数 k_1 および k_2 は各充填粒子特有の定数である。この k_1 、 k_2 は主として粒子表面の粗さに関係し、実験により求めなければならない。(6)式の両辺を ϕ_0 で除し、 $k_1^* = k_1/\phi_0^2$ 、 $k_2^* = k_2/\phi_0$ とおけば次式を得る。

$$\varphi \equiv \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{\mu u_0} \cdot \frac{g_0 D_p^2 \varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} = k_1^* + k_2^* R_{eP} \quad (7)$$

ただし、

$$R_{eP} = \frac{D_p \rho u_0}{(1-\varepsilon)\mu} \quad (8)$$

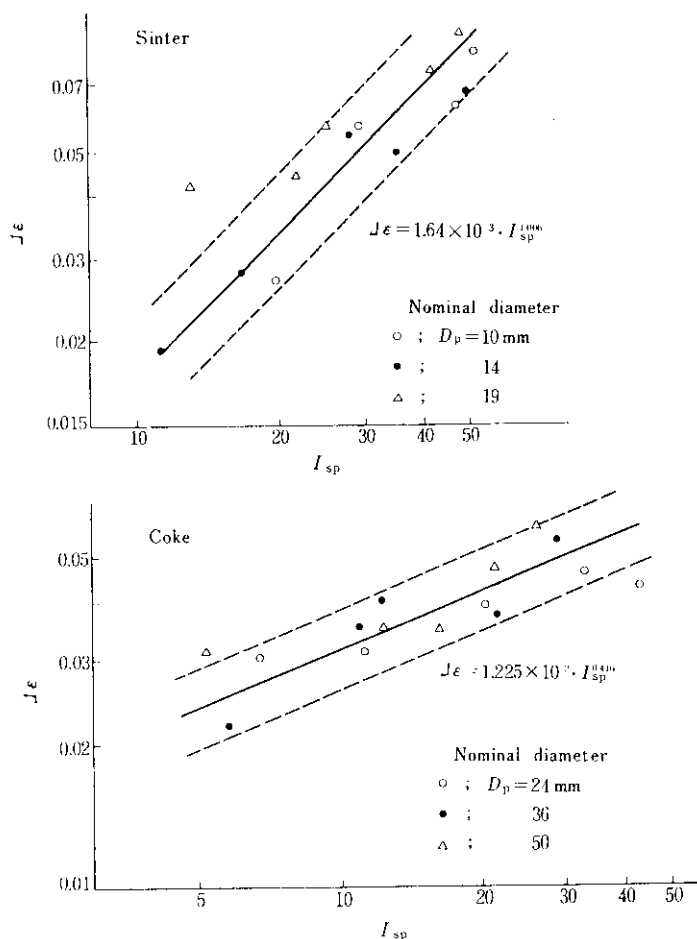


Fig. 6 Relation between reduced ratio of void fraction and I_{sp}

この抵抗係数 k_1^* , k_2^* は各種粒子の表面形状をも含む定数となり、これを高炉装入物について求めておけば (7) 式は高炉シャフト部についても適用できる。実験結果を φ と R_{sp} についてプロットすれば Fig. 7 のような直線が得られ、その切片と勾配から k_1^* および k_2^* が得られる。

コークスおよび焼結鉱について各均一粒径試料の k_1^* および k_2^* を求めたものが Fig. 8 であり、 k_1^* および k_2^* は粒径に依存して変化している。図中の ● 印のプロットは混合粒径試料についての結果を示しているが、その k_1^* および k_2^* は調和平均径に相当する均一粒径試料のそれとほぼ等しい。したがって、粒度分布をもつ高炉装入物の場合にも、(4) 式および (5) 式によってその空隙率の評価ができ、また抵抗係数は D_p を用いて図より次式のごとく求められる。

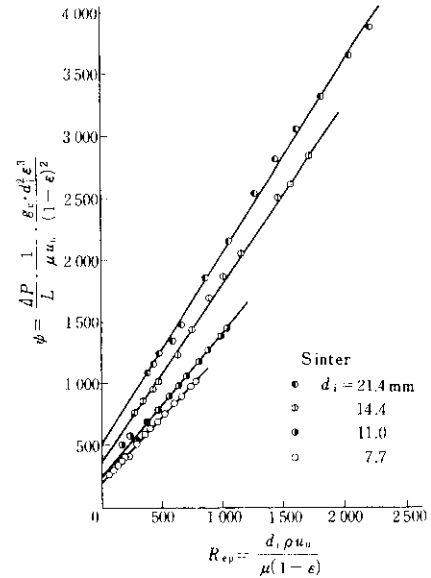


Fig. 7 An example of experimental data from gas permeability measurement

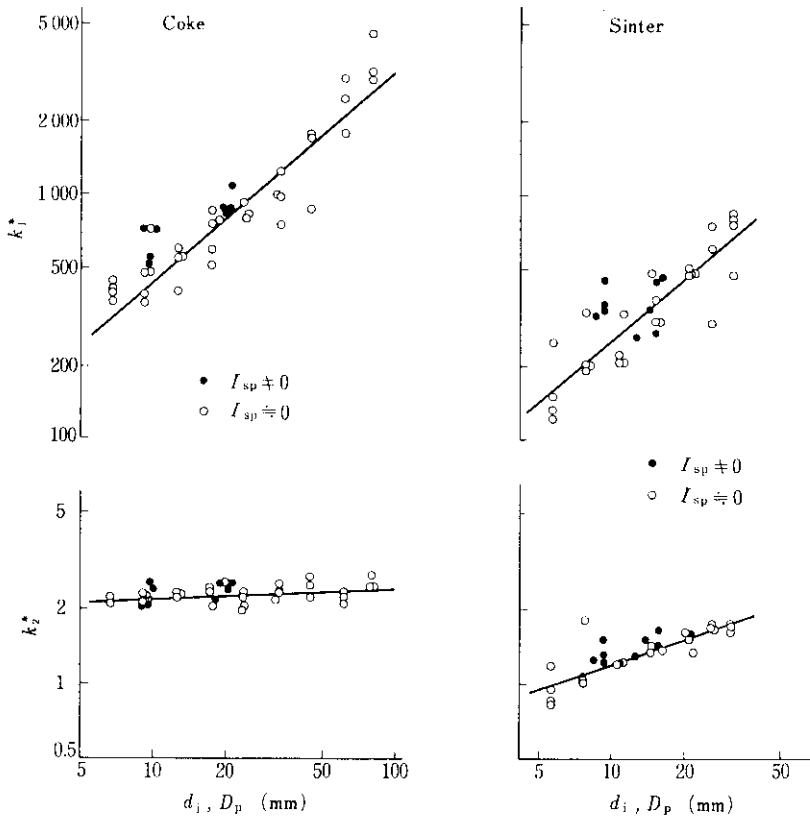


Fig. 8 Dependence of gas flow resistance constant on particle size

$$\text{コークス}; \quad k_1^* = 450D_P^{0.84} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$k_2^* = 2.20D_P^{0.04} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{焼結鉄}; \quad k_1^* = 260D_P^{0.84} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$k_2^* = 1.20D_P^{0.34} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上に述べたことからコークス、焼結鉄の粒度分布が与えられれば、一定の送風条件下での高炉シャフト部における圧力損失は(4)、(5)、(7)および(9)~(12)式より計算できる。

3. 炉内装入物分布の測定内容および方法

水島製鉄所第4高炉には G.H.H. 型 (Gute Hochnung Hütte 社で考案) のムーバブル・アーマー (movable armour) が設置された。その概要を Fig. 9 に示す。ムーバブル・アーマーとは高炉操業に都合の良い装入物分布を得るため、大ベルからすべり落ちてきた装入物を反射させる可動式の鉄鋼板である。このプレート面は図のA点を支点として炉の内側に10段階に分けて移動することができる。この10段階の位置は炉壁側より炉芯方向へ100mm ごとに0ノッチ、1ノッチ、…、10ノッチのように表示される。また Fig. 10 に示すように隣り合うアーマー・プレートの位置は互いに炉芯方向で150mm の差が生じるように配置されている。

調査内容は

- (1) このムーバブル・アーマーのプレート位

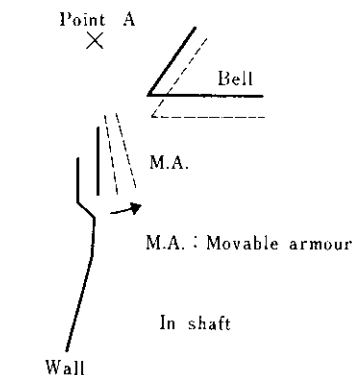


Fig. 9 Schematic representation of M.A. (movable armour)

1, 2, …… = Sampling points
N, S, …… = Measuring blocks

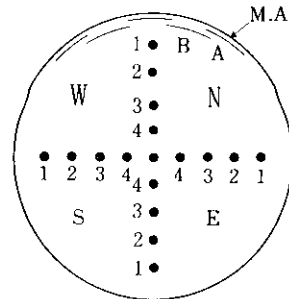


Fig. 10 Locations of M.A. and sampling points in shaft

置 (ノッチ数で表示) と装入物のアーマー・プレート上での当り位置との関係

- (2) ムーバブル・アーマー位置と炉半径方向での装入物表面の堆積形状
- (3) コークス、鉄石類各層の炉半径方向での層厚分布
- (4) コークス、鉄石類について炉半径方向での粒度偏析

の4項目であり、各測定は以下に行なった。なお、測定に先だち、炉横断面を Fig. 10 に示すごとく4つの測定ブロックに分割した。図中に粒度分布測定試料の採取位置も示してある。

3.1 装入物のアーマー・プレート上の当り位置

装入が開始される直前に、表面に白ペイントを塗布した鋼板 (2010⁴ × 200⁴ × 2⁴mm) を各測定ブロックに2枚ずつ用意し、Fig. 11 のごとくア

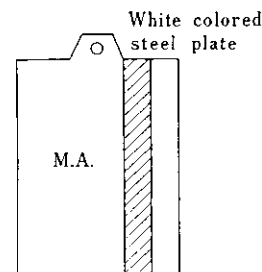


Fig. 11 Schematic representation of the method for measuring the point on M.A. where burden materials collide

マー上に懸けた。装入終了後にこの銅板を取りはずし、装入物の当たった位置を肉眼で観察した。

3.2 装入物表面形状の測定

装入物表面の堆積形状は **Fig. 12** に示す方法で測定した。すなわち、水平方向に器具Aをスライドさせるロープ1を張り、器具Aの水平方向への移動と距離の測定はロープ2で行なった。また、垂直方向の距離は鉛のおもりを先端につけたロープ3で決定した。この方法により装入物表面形状を乱すことなく測定が可能であるが、水平方向に張ったスライド用ロープが中心で 5 cm 程度たるむので、その誤差を補正した。

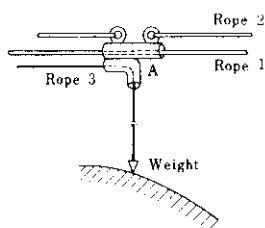


Fig. 12 Schematic representation of the method for measuring the surface shape of charged burden

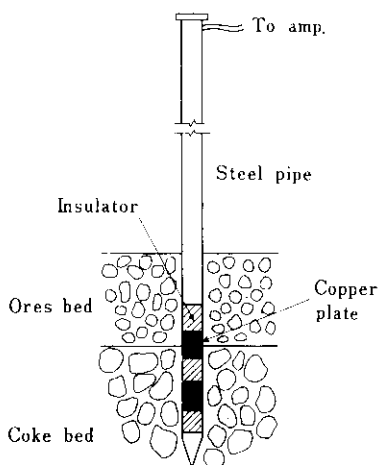


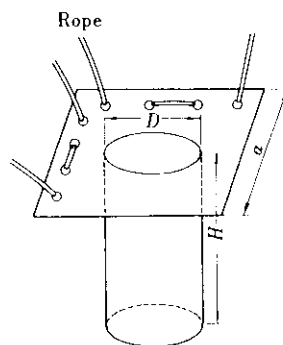
Fig. 13 Schematic representation of method for measuring the thickness of burden materials bed

3.3 層厚分布の測定

装入1チャージ分の層厚の積み重ねは、装入物表面形状の測定値の変化と対応づけられるので、装入ごとのその測定値の差から層厚分布は便宜的に決定できる。しかし、装入時にはその前にある表面形状が乱されるので、層厚分布は単に上述の方法で決定した表面形状の差とは異なるかもしれない。そこで装入物の堆積状態を乱すことなく真の層厚分布を得る測定器を考案した。コークスと焼結鉱（鉱石でも同じ）では電気抵抗が大幅に異なり、焼結鉱ではほとんど電気を通さない。したがって、2枚の銅板を一定距離だけ離して装入物層内に押し込んでやればコークス層では導通があり、鉱石層では導通しない。**Fig. 13** の装置では導通の判定をランプの点滅で行なうようにしている。また、本器具を装入物層内に押し込む際には特殊な形状をしたハンマーを製作し、容易に打込むことができた。この測定は各測定ブロックごとに炉の中心から炉壁に向かって 0, 1, 2.5, 4, 5 m の位置で行なった。

3.4 コークスおよび鉱石類の半径方向における粒径分布

試料採取方法はキャンバス製容器(**Fig. 14**)を **Fig. 10** に示す位置の装入物表面に鉄パイプで固定させ (**Fig. 15**)、装入後装入物中に埋った容器を鉛直に引き上げるものである。得られた試料は次のようにしてふるい分けした。



	a	D	H
For coke	800	350	900
For ore	700	300	900 (mm)

Fig. 14 Canvas bag for sampling

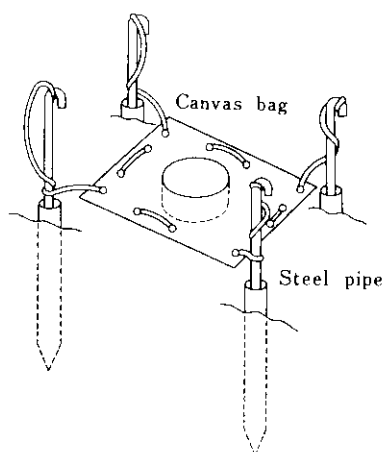


Fig. 15 Schematic representation of sampling method

(1) コークスの場合

乾燥した採取試料から混入している鉱石類(数個程度)を肉眼観察で除いた後、**Table 1** に示すコークスフルイによって 6 mm以下を含む10段階にふるい分けた。6 mm以下の部分に含まれている鉱石類は肉眼による分離が実際上不可能なため、この試料を燃焼することによってコークスと鉱石類とに分離した重量を求めた。

(2) 鉱石類の場合

試料を乾燥した後、主原料、副原料およ

びコークスとに分け、主原料および副原料の各々について **Table 1** の焼結鉱フルイおよび、2.83, 1 mmのフルイによって、1 mm以下を含む11段階にふるい分けた。なお細粒(2.83mm以下)の試料に含まれているコークスは燃焼によって分離した。

一方、高炉装入前の試料は貯鉱槽、貯鉱槽フルイを通過したところで採取し、炉内より採取した試料とどのように粒径分布を測定した。なお、本調査が行なわれた期間中のコークスおよび焼結鉱の強度は次のごとくなっている。

コークス D_{39}^{30} ; 49.6%

D_{15}^{30} ; 95.4%

焼結鉱 $S.I.$; 90.4%

なお D_{39}^{30} , D_{15}^{30} はドラム強度指数, $S.I.$ はシャッター強度指数である。

3.5 調査手順

測定は装入物がストックライン下3.6mのレベルまで填充された後の、各装入ごとに行なった。全調査の順序を **Table 4** に示す。コークスペースは22 tで一定であり、 $O_1 \sim O_4$ は42t/chと立上り操業のための、低い ore/coke のままである。

Table 4 Run of measurement and charging conditions to blast furnace

Run of measurement		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Charging condition	Burden materials	O_0	C_1	O_1	C_2	O_2	C_3	O_3	C_4	O_4	C_5	O_5	C_6
	Weight of burden	32	Coke=22t				Ore=42t				22	105	22
	Notch number (M.A.)	0	0	0	2	2	4	4	6	6	(0, 2, 4, 6)		
	Stock line (m)	3.62	3.31	3.34	2.97	2.85	2.80	2.50	2.30	2.13	0.97	0.69	0.13
Items of measurement	Surface shape of charged materials	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
	Point on the M.A. where burden materials collide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	#	#
	Size distributions of burden in shaft	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	#	#
	Distributions of burden in shaft	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	#	#

; measurement, — ; no measurement

O₅およびC₆は種々の測定を行なったチャージであり、将来の荷増しを想定して ore/coke=4.4 (ただし、副原料を含めた鉱石類とコークスとの1チャージ当りの装入量の比 ore/coke*は4.8)とした。この最後のチャージおよびその前のC₅ではムーバブル・アーマーの位置変化の効果をみるため、前述のごとくノッチ数を円周方向で4分割し、それぞれ0, 2, 4, 6ノッチとし、これらはN, E, S, Wブロックに対応している。

4. 測定結果

4.1 ムーバブル・アーマー位置と装入物の当り位置

得られた結果を Fig. 16 に示す。コークス、鉱石類ともにノッチ数が2だけ増すと当り位置が300mm上方に移動している。また、同一ノッチ数でもコークスの方が鉱石類より150~250mm程度上部でプレートに当たっている。

4.2 炉半径方向の表面形状および鉱石分布

測定開始からの表面形状の推移をN, Sブロック

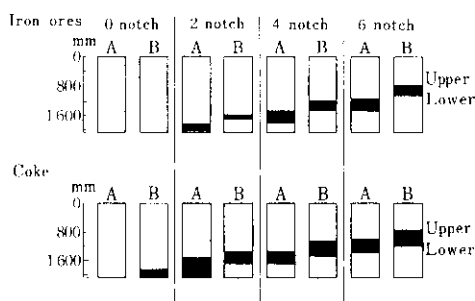


Fig. 16 Point on the movable armour where burden materials collide (A and B refer to Fig. 10)

クについて Fig. 17 に示す。O₀の装入量は副原料を含めて 32t/ch で ore/coke*=1.45 であり、O₁~O₄では装入量 42t/ch, ore/coke*=1.91 であるが、このとき鉱石類は炉壁近傍のごく狭い範囲に偏在している。これに対して、O₅では装入量 105t/ch, ore/coke*=4.8 であり、鉱石類は中心まで到達しており、鉱石類の分布は O₀~O₅で大きく変化している。一般に鉱石類の炉中心方向への入りやすさは装入レベル (ストックライン)、1チャージ当りの装入量およびムーバブル・アーマー位置に左右されるが、1チャージ当りの

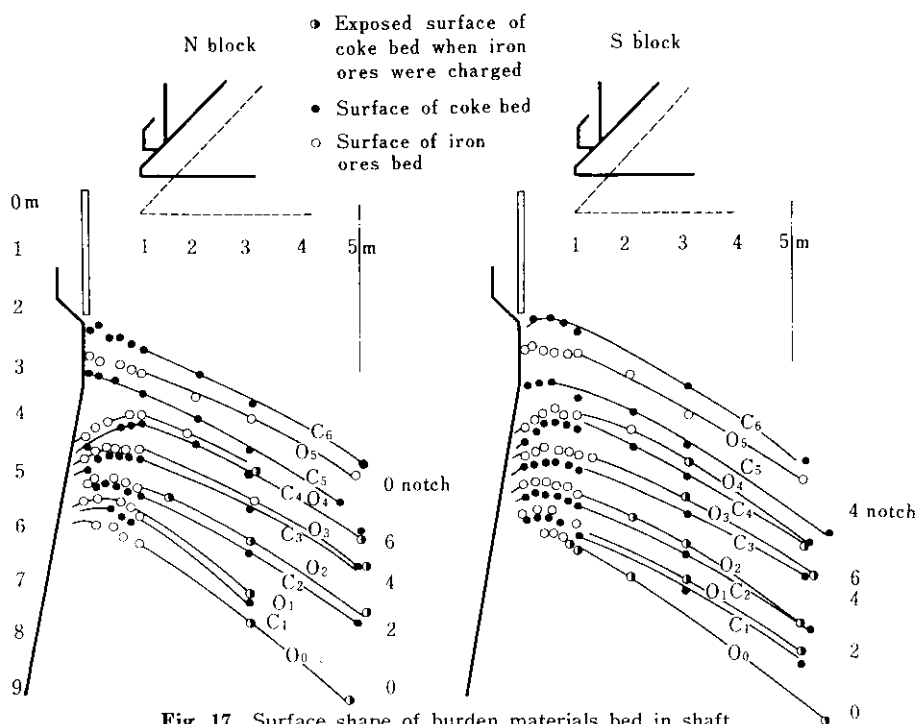


Fig. 17 Surface shape of burden materials bed in shaft

装入量およびアーマー・ノッチ数が大きいほど、炉中心部に入りやすくなると考えられる。Table 5 は、炉壁から中心に向かって鉱石類の存在する領域の長さを示したものである。表中で O_1 から O_4 は同一装入量でアーマー・ノッチ数を変えて装入しているが、その鉱石類の中心方向への入り易さに及ぼす効果は認められない。このとき、装入レベルも変わっているが、同一装入レベルおよび同一装入量の場合にも、後に述べるようにノッチ数の効果は現われていない。したがって、 $O_1 \sim O_4$ の鉱石類の中心方向への到達距離の測定結果は、アーマー・ノッチ数およびこの程度の装入物レベル

の変化の影響は認められないと解釈できる。 O_0 , $O_1 \sim O_4$, O_5 を比較すれば、1 チャージ当りの装入量が多いほど中心方向への到達距離が伸びており、炉半径方向の鉱石分布にはこの装入量が大きく影響するといえる。

Fig. 18 はアーマー位置と表面形状との関係をコークス、鉱石類別に示したものである。図から、コークス、鉱石類ともにノッチ数の増加により、表面形状はV型からM型に移行し、山の位置も炉中心方向に移っている。また、Fig. 16 および Fig. 18 に基づいて装入物の大ベルからの落下軌跡を判定すると、装入物はアーマー・プレートに

Table 5 Extension degree of iron ores to center of B.F.

Burden materials	Notch number	Weight (t/charge)	Stock line (m)	Extension degree (Distance from wall)
O_0	0	32	3.620	1.20m
O_1	0	42	3.340	2.00
O_2	2	42	2.845	1.71
O_3	4	42	2.500	3.31
O_4	6	42	2.125	1.78
O_5	0, 2, 4, 6	105	0.690	Center

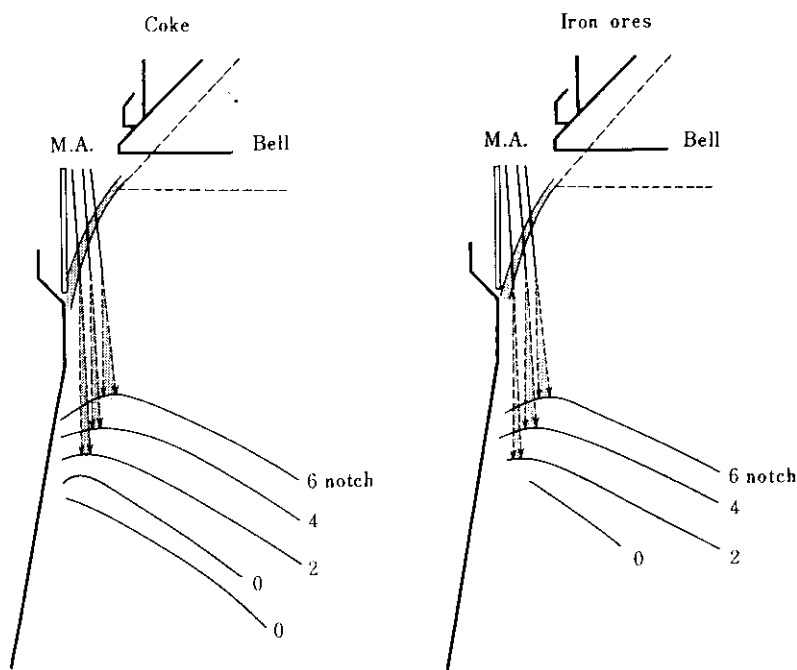


Fig. 18 Relation between the position of M.A. and the surface shape of charged burden

当たった後、ほとんど反発することなく単に面上を滑り、アーマー・プレート下端を通る鉛直線とプレート面の延長線間に落ちるとみなせる。したがって、表面形状の山の位置はこの部分に生じている。

4.3 コークス、鉱石類各層の炉半径方向での層厚分布

同一装入レベルで、ムーバブル・アーマー位置を変えることによるコークス、鉱石類各層の半径方向の層厚分布の変化を Fig. 19 および Fig. 20 に示す。アーマー位置が異なることによる層厚分布の違いは両層ともにほとんど見られないが、炉壁付近（炉壁から1.5 mくらい）で層の堆積形状が異なっている。鉱石（ O_s ）装入時におけるアーマー位置と層厚の関係を Table 6 に示す。表より明らかなごとく、本測定の結果では鉱石類（ O_s ）の層厚分布は中心に寄るほど厚く、コークス（ C_s ）では逆に炉壁に向かって厚くなっており、これは O_s 、 C_s に関する表面形状の測定結果とよく対応している。Fig. 17 に示した表面形状の測定において、鉱石類が炉壁付近に偏在する場合には、鉱石類の装入後、それより炉中心側のコークス層表面がやや上昇する現象が見受けられた。しかしながら、 O_s 、 C_s の層厚測定によって得られた下層の境界面の形状は、上層を装入する以前に形成された下層の表面形

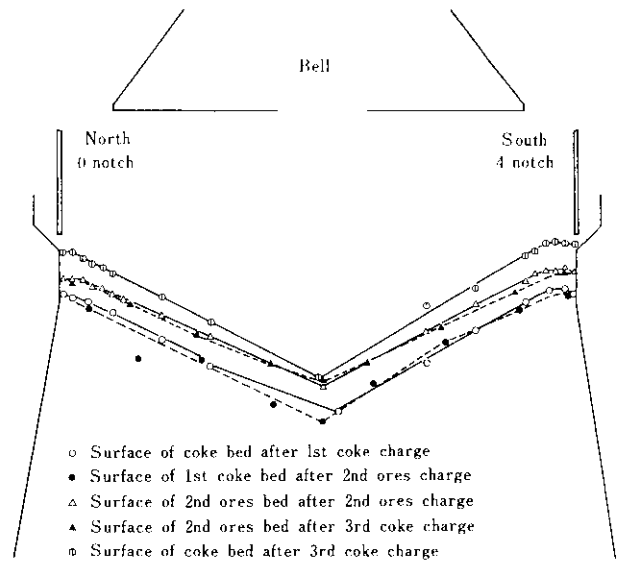


Fig. 19 Distributions of burden materials bed in shaft

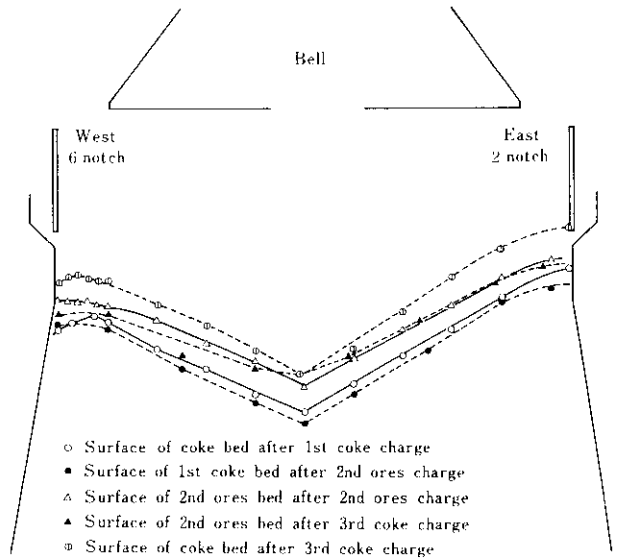


Fig. 20 Distributions of burden materials bed in shaft

Table 6 Relation between the position of M.A. and the thickness of burden materials bed at O_s charge

Block	Notch number	Thickness of bed (cm)				
		1m (Wall)	2m	3m	4m	5m (Center)
N	0	45	50	60	69	73
E	2	55	50	62	70	73
S	4	52	54	50	59	68
W	6	49	60	70	75	75

状とほぼ同一であった。したがって、コークス層上に鉱石を装入する際に生ずるコークスの中心方向への“流れ込み”はほとんど認められず、全体的にコークス層表面が鉱石類の装入により、わずかに沈降したとみなされる現象を生じている。この鉱石によるコークスの“流れ込み”が生じていないことは次項に述べる装入物採取の結果とも一致する。

4.4 コークス、鉱石類の炉半径方向での粒度偏析

炉内試料の採取量は鉱石の場合1袋90~150kg, 合計2085kgであり、コークスの場合1袋30~45kg, 合計642kgであった。各採取位置での試料量が多いことは本測定信頼性を高めている。各試料はすべて、層の表面から下層の表面まで円筒状に採取できた。粒度分析の結果を Table 7, 8

および Fig. 21 に示す。Fig. 21 から明らかなように、コークス、鉱石類ともに粒度偏析状態とアーマー位置とは関係がなかった。コークスの場合、調和平均径 D_p は炉壁から中心に向ってほぼ直線的に増加し、-28mm, -6mmの小粒は大幅に減少している。鉱石類では D_p , -5mmの量が炉壁から2.0~2.5mまでは変化せず、3m付近から D_p は増加し、-5mmの量は急激に減少している。

以上のように、コークスと鉱石類とでは炉壁から中心に向って粒子の拡がり方に差がある。コークスは鉱石に比較して粒径が大きくころがりやすいので、ころがりを主とした運動によって炉壁から中心に拡がり、鉱石類は炉壁から2.0~2.5mまではすべりで移動し、3m付近から大きな粒子だけがころがり始めると考えられる。本測定では炉中心部において、コークス、鉱石類ともに小粒子

Table 7 Samples of iron ores obtained in blast furnace

Sampling point		Notch number	Weight of sample (kg)	Weight of coke mixed in sample(kg)	D_P	I_{SP}	-5mm%	-1mm%
N	1	0	112.20	0.08	5.16	174.7	13.6	3.6
	2	0	141.45	0.15	4.44	190.0	18.0	4.9
	3	0	130.30	1.10	4.43	190.0	17.8	5.1
	4	0	117.25	3.55	4.65	187.2	15.0	4.3
E	1	2	140.75	1.00	4.70	182.4	16.8	4.1
	2	2	164.15	0.05	4.51	184.7	17.6	4.8
	3	2	116.90	0.15	4.65	179.7	16.9	4.6
	4	2	122.80	1.05	5.11	159.9	14.4	3.2
S	1	4	124.10	0.15	4.12	233.4	20.5	6.1
	2	4	145.90	0.20	4.28	203.6	19.9	5.4
	3	4	164.15	0.70	4.55	216.5	17.2	4.5
	4	4	123.40	0.80	5.73	151.5	11.3	2.5
W	1	6	152.75	0.24	4.08	211.4	20.2	5.7
	2	6	140.45	0.07	3.94	216.7	21.6	6.0
	3	6	125.20	0.10	4.00	209.0	21.7	5.5
	4	6	126.20	0.00	4.59	175.5	17.7	4.5
Center			90.90	15.10	7.70	180.0	3.0	1.2
Mean value of samples			122.63	—	4.40	199.6	20.3	5.5
Ores before a charge			—	—	7.70	114.6	5.0	1.7
Newman ore			46.2	—	7.80	103.5	3.6	2.7
Joyo ore			43.5	—	7.47	121.8	3.8	3.3
Sinter			80.9	—	7.74	95.3	6.8	0.6

Table 8 Samples of coke obtained in blast furnace

Sampling point		Notch number	Weight of sample (kg)	Weight of iron ores mixed in sample(kg)	D_p	I_{sp}	-28mm%	-6mm%
N	1	0	44.50	2.47	13.0	330.2	28.8	12.2
	2	0	44.00	0.86	20.5	205.0	16.4	5.4
	3	0	36.90	0.25	30.7	98.0	6.9	1.9
	4	0	33.85	0.07	35.8	87.8	3.5	1.4
E	1	2	42.10	2.76	11.9	300.4	27.0	15.3
	2	2	37.05	1.60	20.4	155.2	16.9	5.4
	3	2	33.45	0.24	30.6	49.9	11.4	1.7
	4	2	32.05	0.15	39.3	68.4	3.2	0.9
S	1	4	43.91	3.91	10.3	389.2	32.6	17.2
	2	4	36.20	1.11	24.0	160.2	12.4	3.9
	3	4	23.45	0.32	30.9	94.9	7.2	1.7
	4	4	32.05	0.05	40.7	75.3	2.9	1.1
W	1	6	45.70	2.00	13.4	546.6	24.3	11.2
	2	6	36.30	0.92	22.8	204.7	13.0	4.2
	3	6	29.40	0.18	36.2	92.9	7.2	1.7
	4	6	31.50	0.08	37.2	63.5	2.9	1.1
Center			12.70	0.08	45.2	88.3	2.6	1.0
Mean value of samples			37.76	—	16.1	304.0	20.4	8.9
Coke before a charge			60.76	—	32.2	89.9	6.3	1.7

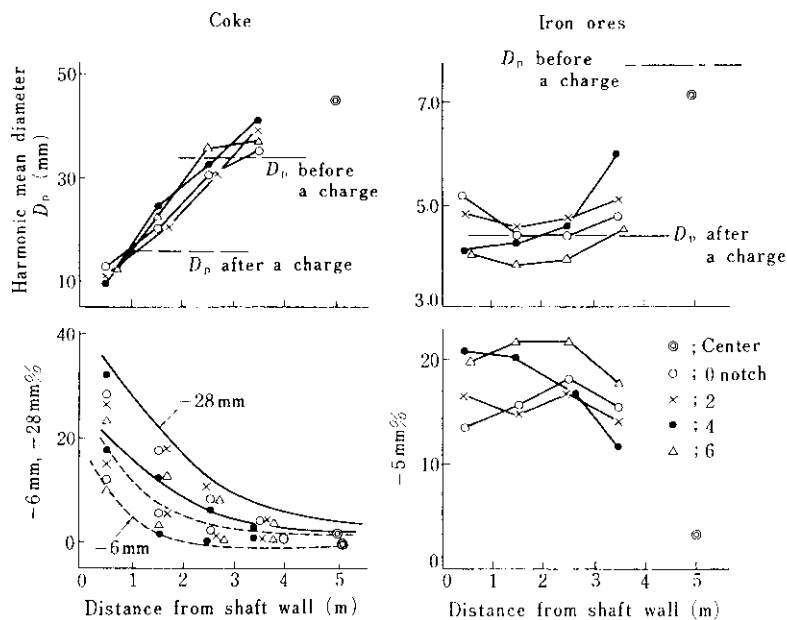


Fig. 21 Size segregation of burden materials in shaft (-6mm% and -28mm% of coke are 6.4 and 1.7, respectively, before a charge. -5mm% of iron ores is 5.9)

がきわめて少なかった。

Table 7 および **Table 8** 中には鉄石類、コークス各採取試料中に混入していたコークス量および鉄石量が示してある。この結果からは、鉄石層上にコークスを装入した際に生ずる相互の“巻き込み”は認められない。各測定ブロックの炉壁付近における鉄石類のコークスへの混入は固定ホッパー、大小ベル内ですでにおきていたと考えられる。一方、コークス層上に鉄石類を装入した際には炉中心でコークスの鉄石層への混入があった(体積比でO:C=6:5程度)が、いわゆる“巻き込み”と異なり、試料容器内で上に鉄石、下にコークスの2層を形成した状態で採取された。このような炉内採取試料から得た“巻き込み”に関する結果は、層厚分布の測定によって得られた情報と一致する。しかし今回の測定では、試料採取容器を各測定ブロックとも炉壁から中心に向けて直線状に配置したため、“流れ込み”が抑制された可能性もある。

5. 考 察

5.1 装入前試料と炉内採取試料との粒度分布の比較

炉内採取試料について、コークス、焼結鉄、生鉄石別に各試料採取位置での存在量(体積)の重みづけを施した炉内平均粒度分布を求め、装入前試料の粒度分布と比較した結果を **Fig. 22** に示す。

この結果を調和平均径と粉率に注目して整理したのが **Table 9** であり、装入物が貯鉄、貯鉄槽から切り出され高炉内に入る過程で相当量破砕されることがあきらかになった。種類別でみると生鉄石はほとんど破砕されず、焼結鉄が最も粉砕されている。**Fig. 22** より、コークスは装入前と粒度分布が良く対応しているが、炉内で微粉が多くなっており、コークスの破砕のされ方が主として abrasion によることを示している。また、焼結

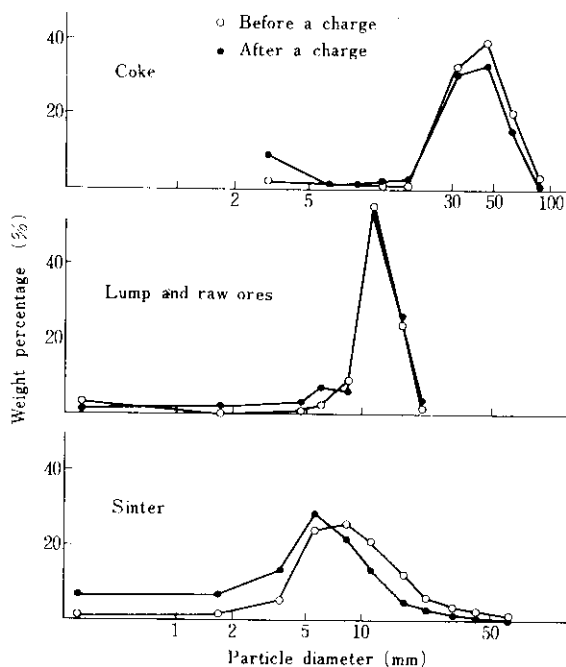


Fig. 22 Size distribution of burden materials before and after a charge

Table 9 Comparison of burden materials before a charge with after a charge (Harmonic mean diameter D_p and fines fraction)

		D_p (mm)	Ratio of D_p , A/B	D_p^* (mm)	Ratio of D_p , A/B	Fines fraction, %	Ratio of fines, A/B
Coke	before (B)	32.20		40.90		1.8	
	after (A)	16.10	0.50	36.50	0.89	9.6	5.5
Sinter	before (B)	7.74		8.50		1.2	
	after (A)	2.50	0.32	6.76	0.80	13.5	11.3
Raw ore	before (B)	7.61		11.91		3.0	
	after (A)	6.71	0.88	10.71	0.90	3.1	1.0

Definition of fines; Coke -8mm, Iron ores -2.83mm

* Calculated value except fines

鉱では大径粒子が少なくなり、小粒子および微粒子が増しており、粒子破壊があったことを示している。ここで、ほとんど破碎されない生鉱石が炉内と装入前とで粒度分布が同一であることは、今回行った試料採取が信頼性の高いものであることを裏付けている。

5.2 微粉の炉外への排出について

前項までに述べたように、炉内に大量の微粉が存在することがわかったが、そのうち炉頂ガスとともに炉外に排出される量を推定する。

流体中の粒子の運動方程式は次式で与えられる。

$$m \frac{du}{dt} = \frac{m}{\rho_p} (\rho_p - \rho) g - C \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \quad (13)$$

粒子の流体による吹き上げは、(13)式の右辺第1項と第2項の大きさが等しくなる場合の流速 u_t を超える領域で生じる。 C もレイノルズ Re を通して u_t の関数であるから、 $C=f(Re)$ を与える必要がある。(13)式から得られる次式

$$u_t = \{ 2m(\rho_p - \rho)g / (C \cdot \rho \cdot \rho_p \cdot A) \}^{1/2} \quad (14)$$

を用いて、Table 10 に示す水島製鉄所 3, 4 高炉における操業実績値から、コークス、焼結鉱および生鉱石の粒子径と u_t との関係を求めると Fig. 23 および Fig. 24 のようになる。図中 $\bar{u}$ はそれぞれ 3, 4 高炉の計算炉口ガス速度である。図より、各粒子の吹き上げ限界粒径は次のようになる。

	$\rho_p(\text{g/cm}^3)$	$(d_i)_{3\text{BF}}(\text{mm})$	$(d_i)_{4\text{BF}}(\text{mm})$
コークス	0.95	0.45	0.37
焼結鉱	3.2	0.21	0.18

生 鉱 石 4.5 0.16 0.14
一方、炉内採取試料の 1 mm 篩下はコークスで約 3.8%，鉱石で約 5.5% となっており、それぞれ

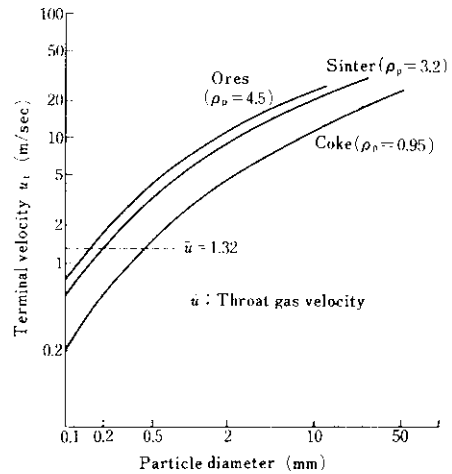


Fig. 23 Terminal velocity of particle under operational conditions of 3B.F.

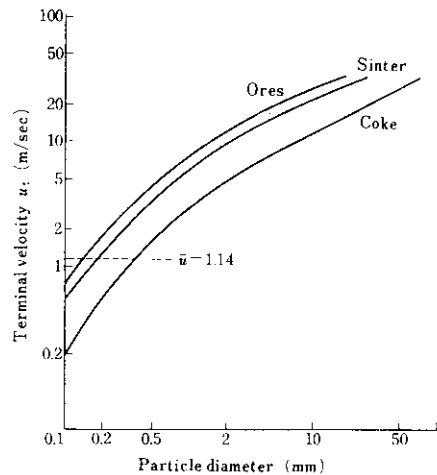


Fig. 24 Terminal velocity of particle under conditions of 4B.F.

Table 10 Operational results

B.F. No	Blast vol. (Nm ³ /min)	O ₂ enrich. (%)	Top gas press. (g/cm ² -G)	Top gas temp. (°C)	Composition of top gas (%)				Throat dia. (m)
					CO	CO ₂	N ₂	H ₂	
3	6 320	3.70	1 860	107	22.4	23.8	49.0	4.8	8.8
4	6 264	0	1 500	163	23.1	20.6	54.4	2.3	10.5

の粒度分布は Fig. 25 のようになっている。したがって、計算上平均炉口ガス速度で吹き上げ、排出されるダストはコークス装入量の約 3.2%，鉬石装入量の約 2.5% となり、全体で装入量の約 2.6% のダスト発生量となるはずである。しかし現実には、高炉の乾ダストおよびスラジの和は装入量の 0.2～0.3% であるから、計算ダスト比は実際のダスト比よりはるかに大きい。この点に関連して、浜田⁷⁾は Fig. 26 (a) に示すような基礎的実験を行なっている。すなわち、粗粒子 (1.2～1.4mm) の充填層中のある高さに微粉 (0.1～

0.05mm) を入れておき、粗粒子の流動化開始速度 u_{mf} より小さく、微粉の終末速度 u_t より大きい流速で空気を 20min 間流した後、微粉の層内に残留する割合をもとめている。その結果は Fig. 26 (b) のごとく、層表面近くにある場合を除けば、排出される微粉が少ないことを示している。したがって、前述の計算結果も、いったん炉内に装入された微粉はダストとして排出され難いと解釈される。

5.3 シャフト部での通気抵抗およびガス流分布

今回の測定で得られた結果から、ore/coke = 4.4 (ore/coke* = 4.8) の場合について通気抵抗分布およびガス流分布を求めてみる。

基礎実験の結果から、炉内での装入物の空隙率および圧力損失式は調和平均径 D_F および粒度分布指数 I_{SP} を用いて次のごとく与えられる。

コークスの場合；

$$\varepsilon = (0.153 \log D_F + 0.418) (1 - \Delta\varepsilon)$$

$$\Delta\varepsilon = 1.225 \times 10^{-2} \cdot I_{SP}^{0.415}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 450 \frac{(1-\varepsilon)^2}{g_c \cdot D_F^{1.16} \varepsilon^3} \mu u_0 + 2.20 \frac{(1-\varepsilon)}{g_c \cdot D_F^{0.96} \varepsilon^3} \rho \cdot u_0^2 \quad (15)$$

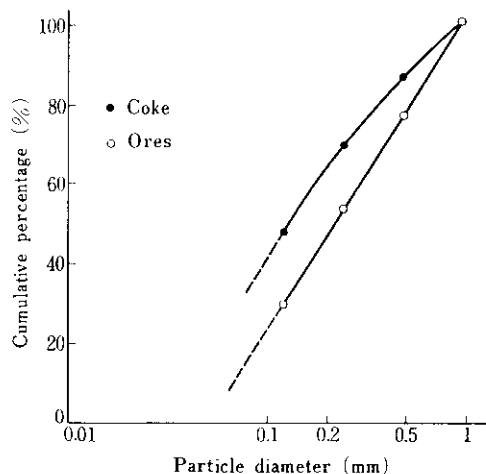


Fig. 25 Size distributions of fines sampled from blast furnace

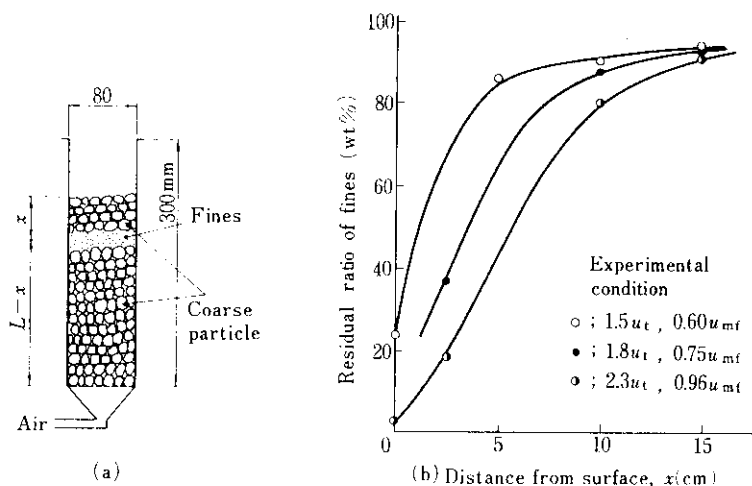


Fig. 26 Experimental apparatus and results on measuring the motion of fines in solid-gas packed bed⁷⁾
(u_t = terminal velocity, u_{mf} minimum fluidization velocity)

焼結鉱の場合；

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 0.403 \cdot D_p^{0.14} \cdot (1 - \Delta\varepsilon) \\ \Delta\varepsilon &= 1.64 \times 10^{-3} I_{SP}^{1.006} \\ \frac{\Delta P}{L} &= 260 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{g_c \cdot D_p^{1.16} \varepsilon^3} \mu u_o \\ &+ 1.20 \frac{(1 - \varepsilon)}{g_c \cdot D_p^{0.66} \varepsilon^3} \rho \cdot u_o^2 \dots \dots (16)\end{aligned}$$

炉内試料の調査結果から、各測定ブロックのおのおのにおける半径方向の D_p 、 I_{SP} の変化は **Table 7** および **Table 8** のように与えられるので、炉内のコークス、鉱石両層の通気抵抗指数および両層を層厚で平均した全体としての通気抵抗指数を求めることができる。まず、コークス、鉱石類について微粉を除いたそれぞれ +8.0mm、+2.83mm について上式を適用し、各測定点における ε を求め、微粉はその体積だけ空隙率を小さ

くするものとして ε を補正し、これを新たに ε とした。この各測定点におけるコークス層、鉱石層の ε と層厚 (L_c , L_o) を **Table 11** に示す。これらの分布定数を、(15)、(16)式に代入し、水島製鉄所第3高炉の操業条件にもとづいて、コークスおよび鉱石層の圧力損失 $(\Delta P/L)_{\text{calcul}}$ を計算し、その結果から次式によりそれぞれの層の通気抵抗指数 Φ を求めた。

$$\Phi = (\Delta P/L)_{\text{calcul}} / (\rho^{0.7} \cdot \mu^{0.3} \cdot u_o^{1.7}) \dots \dots (17)$$

全体としての通気抵抗指数 Φ_t は次式によった。

$$\Phi_t = (\Phi_c \cdot L_c + \Phi_o \cdot L_o) / (L_c + L_o) \dots \dots (18)$$

このようにして求めた Φ_c 、 Φ_o および Φ_t の分

Table 11 Data obtained from the present measurement for calculating gas flow resistance coefficient of blast furnace

Measuring point		Mean thickness of bed (cm)		Void fraction (—)	
		Coke; L_c	Iron ores; L_o	Coke, ε_c	Iron ores, ε_o
N	1	55.0	45.0	0.424	0.362
	2	48.5	50.0	0.493	0.353
	3	40.0	60.0	0.513	0.355
	4	25.0	68.5	0.523	0.352
E	1	71.5	55.0	0.442	0.354
	2	61.5	50.0	0.499	0.351
	3	51.5	61.5	0.515	0.357
	4	35.5	70.0	0.526	0.355
S	1	63.5	51.5	0.424	0.349
	2	55.0	53.3	0.501	0.348
	3	43.5	50.0	0.514	0.350
	4	23.5	58.5	0.529	0.363
W	1	66.5	43.5	0.449	0.347
	2	58.5	60.0	0.490	0.344
	3	50.0	70.0	0.510	0.344
	4	31.5	75.0	0.526	0.353
Center		14.0	71.8	0.536	0.372

布を Fig. 27 に示す。ここで添字 C, O はそれぞれコークス層, 鉱石層についての値を示す。図よりコークス層の通気抵抗指数は炉壁から中心に向けて一様に減少しているが, 鉱石層のそれは中心部で低くなっているほかは, 半径方向であまり変化はない。そして鉱石層の通気抵抗指数はコークス層に比べて非常に大きいので, 全体としての通気抵抗分布は半径方向でほぼ均一となっている。

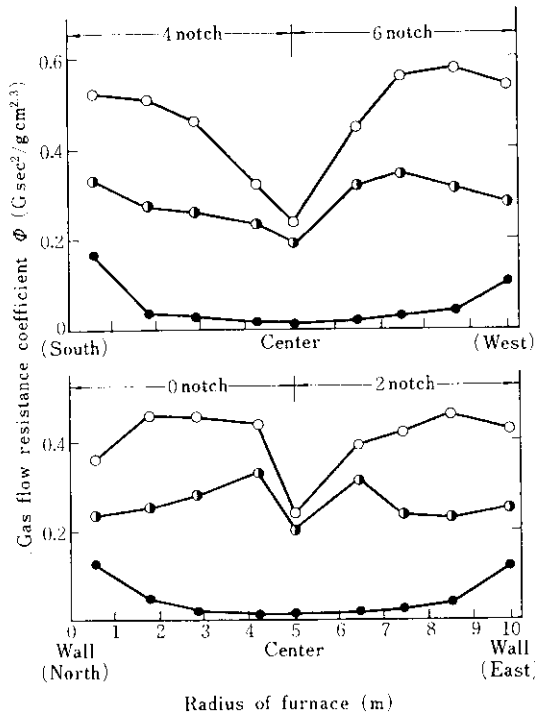


Fig. 27 Distribution of gas flow resistance coefficient in shaft (○; iron ore bed, ●; coke bed, ◐; mixed bed)

また, 炉内各測定点における単位層厚当りの圧力損失が等しく (すなわちガス流れが炉軸方向のみ) $\Delta P/L=1.0$ の場合, (15) 式および(16) 式にそれぞれ $L_c/(L_c+L_o)$ および $L_o/(L_c+L_o)$ をかけて和をとれば左辺は1.0となる。この u_o に関する2次式を解いて求めた炉内のガス流速分布を Fig. 28 に示す。ガス流速分布は半径方向にも円周方向にも, 通気抵抗分布以上に均一となっている。

ここで得られた結果は, 通常の操業時に炉内赤外線カメラなどで検出される中心流が大なる現象

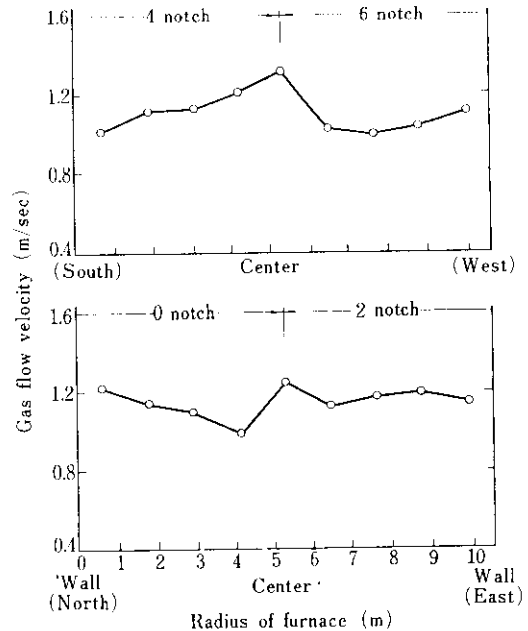


Fig. 28 Distribution of gas flow velocity in shaft

と異なっている。これは Table 11 に示したように, 今回の測定結果では中心部の鉱石層厚が周辺部より大きかったためである。この鉱石層が中心部で厚く, 逆にコークス層が中心部で薄くなったのは, 炉口断面積に比して, 1チャージ当りのコークス装入量が少なく, 鉱石類の装入量が多かったためと考える。すなわち, 安息角および炉内傾斜角⁹⁾の大きいコークスはその装入量が少ないため炉中心部まで流れ込む割合が少なくなり, 従来模型実験などにより観察されている中心部で緩やかな表面勾配をもつコークス層を形成するに至らず, コークスと鉱石の安息角の差によって炉壁側に厚く分布したと考えられる。この1チャージ当りのコークス装入量 (コークス・ベース; C_B) の最適値は相似条件によれば炉口径 D_T の3乗に比例する筈である。水島製鉄所の既設高炉について通常用いている C_B は Fig. 29 の関係にあり, これらは次式を満足している。これに対し, 4B.F. 測定時の $C_B=22t$ は大幅に低くなっている。

$$C_B = 0.0288 D_T^3 \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式で明らかなように, 相似条件に従えば, 炉

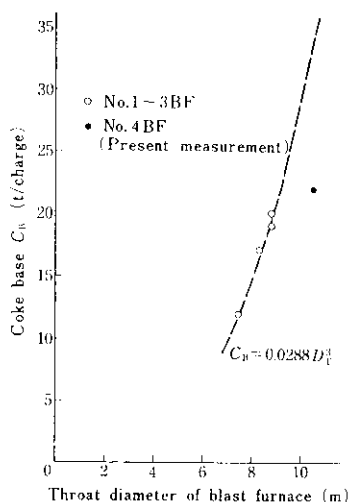


Fig. 29 Coke base in each B.F. performance at Mizushima Works

口径の拡大にともなうコークス・ベースを急激に増大させる必要があり、大型高炉で最適なコークス・ベースを見出すことは重要な課題となるであろう。

これまでの検討結果に基づいて、ムーバブル・アーマーのシャフト部ガス流分布に及ぼす効果を総括すれば、本測定条件のようにコークスと鉱石類とを同一アーマー位置で装入した場合には、アーマー位置と炉内半径方向における通気抵抗分布との間には顕著な関係は認められない。しかしながら、アーマー位置の変化により装入物表面形状の分布は炉周辺部で大幅に異なっていることから、コークスと鉱石類とを別々のアーマー位置で装入すれば通気抵抗分布およびその結果としてのガス流分布は炉周辺部で大幅に変わりうる。したがって、炉全体として中心流、周辺流を制御することが可能である。しかし、炉中間部および炉中心部では装入物表面形状および粒度分布がアーマー位置によりほとんど変化しないので、この部分における通気抵抗分布を、ムーバブル・アーマーによって局所的に制御することは困難であろう。

6. 結 び

水島製鉄所第4高炉の填充時を利用して実炉に

おける装入物分布を測定し、そのための基礎実験の結果とあわせて、次のような事柄が明らかになった。

- (1) 実用粒度範囲におけるコークスおよび焼結鉱の安息角、嵩密度、見かけ密度および通気抵抗係数の粒子径に対する依存性が明らかとなった。
- (2) 装入物はムーバブル・アーマー・プレートによってほとんど反発されず、プレート下端直下からプレート面の延長線間に落下する。したがって、ムーバブル・アーマーのノッチ数が0～2では表面形状はV型であり、それよりノッチ数が増加するとM型分布となる。
- (3) 層厚分布の測定結果から、本測定の条件下ではムーバブル・アーマーのプレート位置の違いによる炉中心部での層厚分布の差異は認められなかった。また、コークス層（あるいは鉱石層）上に鉱石（コークス）を装入しても、下層表面の形状に大きな変化はなく、鉱石を装入した場合に中心部でわずかにコークスの流れ込みが認められた程度である。
- (4) コークスは半径方向の粒度偏析が大きく、鉱石類では小さい。これは炉内に落下した後の挙動がコークスでは“ころがり”、鉱石では“流れ”を主としていることを示している。しかし、いずれもムーバブル・アーマー・プレート位置による偏析状態の差はなかった。
- (5) 貯鉱、貯骸槽から炉内に堆積するまでの間に、焼結鉱はかなり破碎され、コークスでは微粉が増加することがわかった。生鉱石はほとんど破碎されず、装入前と同じ粒度分布であった。
- (6) 本測定の条件下では、得られた通気抵抗分布は半径方向で非常に均一であった。諸測定の結果を総合すると、ムーバブル・アーマーの位置を操作することにより、炉中心部および中間部における通気抵抗と炉周辺部のそれとの相対割合を大きく変えることが可能である。しかし、炉中心部および

中間部における通気抵抗分布を局所的に制御することは難かしい。

本研究の遂行にあたり、技術研究所製鉄研究室および川鉄化学(株)水島工場の関係者各位にご協力をいただきましたことを深謝します。

記号

A ; 粒子の運動方向に垂直な投影面積	(cm^2)
C ; 単一粒子の流体中での抵抗係数	(—)
C_B ; コークス・ベース	(t)
d_i ; 均一粒径試料の粒子径	(cm)
D_F ; 調和平均径	(cm)
D_T ; 炉口径	(m)
g ; 重力の加速度	(cm/sec^2)
g_C ; 重力換算係数	($\text{g} \cdot \text{cm}/\text{sec}^2 \cdot \text{gw}$)
k_1, k_2, k_1^*, k_2^* ; 充填層の通気抵抗係数	(—)
L ; 充填層高さ	(cm)
m ; 粒子1個の質量	(g)

ΔP ; ガスの圧力損失	(gw/cm^2)
u ; 粒子と流体との相対速度	(cm/sec)
u_0 ; 空塔基準のガス流速	(cm/sec)
u_t ; 粒子の終末速度	(cm/sec)
w_i ; 粒径 d_i なる粒子の重量分率	(—)
ϵ ; 空隙率	(—)
θ ; 時間	(sec)
μ ; ガスの粘度	(poise)
ρ ; 流体の密度	(g/cm^3)
ρ_a ; 充填層の空隙率に関する粒子見かけ密度	(g/cm^3)
ρ_b ; 充填層の嵩密度	($\text{g}/\text{cm}^3(\text{bed})$)
ρ_F ; 粒子の密度	(g/cm^3)
Φ ; 通気抵抗指数	($\text{gw} \cdot \text{sec}^2/\text{g} \cdot \text{cm}^{2.3}$)
Φ_i ; 高炉シャフト部平均の通気抵抗指数	($\text{gw} \cdot \text{sec}^2/\text{g} \cdot \text{cm}^{2.3}$)
ϕ_C ; Carman の形状係数	(—)

参考文献

- 1) R. Jeschar: Arch. Eisenhüttenw., **35** (1964) 2, 91
- 2) P. C. Carman: Trans. Inst. Chem. Eng., **15** (1937), 150
- 3) M. Leva, M. Grummer: Chem. Eng. Prog., **43** (1947) 12, 713
- 4) 菊池, ほか: 学振製鉄第54委資料-1280, (1973)
- 5) J. E. Ayer, F. E. Soppet: J. Amer. Ceram. Soc., **49** (1966) 4, 207
- 6) 福武, 岡部: 鉄と鋼, **57** (1971) 10, 1627
- 7) 浜田: 未発表
- 8) 城本, ほか: 製鉄研究, **272** (1971), 9711